

TWDM-PONに基づくフロントホールネットワークの 機能配置の最適化に関する一検討

長谷川 剛[†] 村田 正幸^{††} 中平 佳裕^{†††} 鹿嶋 正幸^{†††} 阿多 信吾^{†††}

[†] 東北大学 電気通信研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

^{††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{†††} 沖電気工業株式会社 〒335-8510 埼玉県蕨市中央 1-16-8

^{††††} 大阪市立大学 大学院工学研究科 〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138

E-mail: †hasegawa@riec.tohoku.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp, †††{nakahira523,kashima567}@oki.com,

††††ata@osaka-cu.ac.jp

あらまし 本報告では、TWDM-PON を用いて構築される第5世代携帯電話ネットワークのためのフロントホールネットワークを対象に、ベースバンド処理の機能分割の最適化を行うための数学モデルを構築することで、機能分割に関する知見を得ることを目的とする。具体的には、TWDM-PON のネットワーク資源量、基地局数、トラフィック量、サーバの消費電力などを考慮して、ベースバンド処理の各レイヤの処理を基地局サイトと局舎サイトで分割して実行することで、システム性能を最適化する最適化問題を定義し、数値例を示し、システムの各パラメータと最適な機能分割との関係を明らかにする。

キーワード 第5世代携帯電話、フロントホール、DWDM-PON、機能分割、ベースバンド処理

A study on functional splitting optimization of fronthaul network based on TWDM-PON

Go HASEGAWA[†], Masayuki MURATA^{††}, Yoshihiro NAKAHIRA^{†††}, Masayuki KASHIMA^{†††}, and

Shingo ATA^{††††}

[†] Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{†††} Oki Electronics Industry Co., Ltd.

1-16-8, Chuo, Warabi-shi, Saitama 335-8510, Japan

^{††††} Graduate School of Engineering, Osaka City University

3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: †hasegawa@riec.tohoku.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp, †††{nakahira523,kashima567}@oki.com,

††††ata@osaka-cu.ac.jp

Abstract In this report, the mathematical model for power consumption of 5G fronthaul network with functional splitting of baseband processing is constructed, to make clear the power consumption characteristics in functional splitting. We formulate the integer linear programming problem for minimizing the total power consumption of 5G fronthaul network based on the capacity of DWDM-PON, the number of RRHs in each cell site, the amount of traffic from each RRH, physical/virtual server power consumption characteristics, and so on. The numerical examples are shown for confirming the effectiveness of the proposed model and exhibit the relationships of functional splitting selections and power consumption.

Key words 5G, fronthaul network, DWDM-PON, functional splitting, baseband processing

1. はじめに

LTE ネットワークにおいては、ベースバンド処理を基地局で行わず、基地局を収容している局舎(セントラルオフィス)に設置された Base Band Unit (BBU) において行うことで、基地局の導入コストの低減や、複数基地局の協調制御が可能となる CRAN (Cloud RAN) 構成が用いられることがある [1, 2]。さらに、セントラルオフィスにおけるベースバンド処理をハードウェアではなく汎用サーバ上のソフトウェアや仮想サーバで行うことによって、トラフィック量やセル構成に応じてサーバ資源を適応的に利用することが可能となり、消費エネルギーの削減が可能となる。この時、基地局とセントラルオフィス間のネットワークは Common Public Radio Interface (CPRI) と呼ばれるインタフェースによって接続され、ベースバンド処理が行われていない基地局のトラフィックが運ばれるが、CPRI の特性上、そのトラフィック量が大きく、かつ、モバイル端末からの実トラフィック量に依存しないため、フロントホールネットワークの敷設コストが増大する。この問題に対しては、フロントホールネットワークをイーサネット等のパケットネットワークで構築する Next Generation Fronthaul Interface (NGFI) [3] や、Passive Optical Networks (PON) によるフロントホールネットワークの構築 [4, 5] 等が検討されている。

また、5G ネットワークにおいては、ベースバンド処理をレイヤ境界で分割し、低いレイヤの処理を基地局 (RRH) 側で行い、処理後のトラフィックをフロントホールネットワークで運び、残りの処理をセントラルオフィス側で行う、機能分割が検討されている [6, 7]。低レイヤ処理を基地局側で行うことにより、フロントホールネットワーク負荷が低減されることが期待される。また、処理を汎用サーバ上で動作する仮想サーバで行うことで、機能分割の境界をアプリケーション要求やトラフィック量などに動的に変更できる。しかし、基地局側にベースバンド処理を行うためのサーバ機器が必要となるため、システム全体の消費電力や導入コストの増大が発生するため、それらを考慮した機能分割の決定が課題となる。

この問題に対しては、RRH 毎に CRAN/DRAN 構成を選択する手法 [8]、機能分割のパターンがパケットネットワークで構成されるフロントホールネットワーク負荷に与える影響の評価 [9]、ベースバンド処理とモバイル端末処理を合わせてクラウド/フォグノードへオフロードする手法 [10] などが既存研究として挙げられるが、DWDM-PON をフロントホールネットワークとして用い、ベースバンド処理前後のトラフィックの収容を考慮したシステムの消費電力解析モデルは存在しない。

そこで本報告では、5G のベースバンド処理の機能分割パターンが、ベースバンド処理にかかる消費電力やフロントホールネットワークに与えるトラフィック負荷などを考慮し、RRH から発生するセルラトラフィック (以下、RRH トラフィックと称する) を処理する際の機能分割を RRH 毎に決定することでシステムの最適化を図ることを目的とする。そのために、まず、DWDM-PON を利用して構成される 5G のフロントホールネットワークを、DWDM-PON の容量、RRH の分布、各 RRH から発生するトラフィック量、システムを構成する各要素の消費電力特性などを考慮してモデル化する。次に、RRH トラフィックのベースバンド処理を行うために必要となる消費電力を最小化するための最適化問題を、整数線形計画問題として定式化する。さらに、数値例を示すことによって、物理/仮想サーバの消費電力特性が、適切な機能分割の選択に与える影響を明らかにする。

本報告の構成は以下の通りである。2. 章で、本報告で用いるネットワークモデル、ベースバンド処理の機能分割モデル、及び消費電力モデルについて述べる。3. 章では、システムの総消費電力を最小化するための最適化問題を定義する。4. 章で数値例を示し、物理/仮想サーバの消費電力特性が、適切な機能分割の選択に与える影響を示す。最後に 5. 章で関連研究を、6. 章で本報告のまとめと今後の課題をそれぞれ述べる。

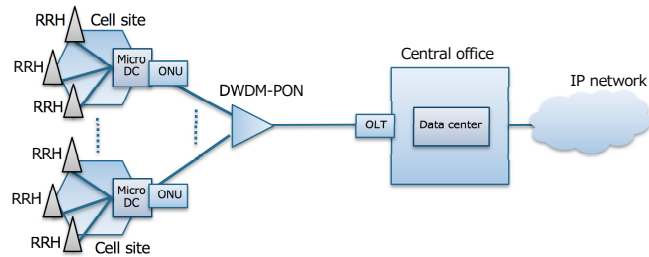


図1 ネットワークモデル

2. 解析モデル

2.1 ネットワークモデル

図1に、本稿で用いるネットワークモデルを示す。本モデルは、文献 [8] に示されたものに基づき、拡張を行ったものである。複数のセルサイト (Cell site) が DWDM-PON によってセントラルオフィス (Central Office) に接続されている。セルサイトには1つあるいは複数の Remote Radio Head (RRH) が収容されており、各 RRH で発生したトラフィックは、セルサイトの Optical Network Unit (ONU)、及びセントラルオフィスの Optical Line Terminal (OLT) を介して運ばれる。DWDM-PON は複数の波長を用いることができる Passive Optical Network (PON) であり、セルサイトの ONU は収容される波長を選択できるものとする。セルサイト及びセントラルオフィスにはベースバンド処理を行うためのサーバが収容させたデータセンタ (Data center) が設置されており、セルサイトのそれを特にマイクロデータセンタ (Micro DC) と呼ぶ。

各 RRH で発生したトラフィックに対して、セルサイトのマイクロデータセンタ、セントラルオフィスのデータセンタ、あるいはその両方でベースバンド処理が行われ、IP パケットが IP ネットワーク (IP network) へ送られる。

2.2 ベースバンド処理の機能分割モデル

本報告においては、文献 [11, 9, 12, 10] を参考に構築したベースバンド処理の機能分割モデルを用いる。表1に、1つの RRH から発生するセルラトラフィックのベースバンド処理が行われる際の、3パターンでの機能分割 (Split 1-3) における、RRH、マイクロデータセンタの DC (Micro DC)、セントラルオフィスの DC (Central office DC) における処理量と、DWDM-PON におけるトラフィック量を示す。どの分割パターンにおいても、RRH において RF、A/D 処理が行われる。各分割パターンにおける、DWDM-PON を流れるトラフィック量については文献 [9] を、処理量については文献 [11] にそれぞれ基づいて決定している。

Split 1 は、CRAN (Cloud RAN) 構成に相当する分割パターンであり、マイクロデータセンタにおいて CPRI 処理が行われ、CPRI トラフィックが DWDM-PON によって運ばれる。そのため、実トラフィック量に関係なく多量のトラフィック (2.4Gbps) が発生する。また、マクロデータセンタにおける処理量が最も大きいのは、CPRI 処理を行うためである。

Split 3 は、DRAN (Distributed RAN) 構成に相当する分割パターンであり、マイクロデータセンタで全てのベースバンド処理を行い、ユーザトラフィックである IP パケットが DWDM-PON 上によって運ばれる。そのため、発生するトラフィック量は RRH に接続される端末数や端末からのトラフィック量によって変化する。表1においては、文献 [9] に基づき、3パターンのユーザトラフィック量を想定している。

Split 2 は、Split 1 と Split 3 の中間的な分割パターンであり、マイクロデータセンタにおいて Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 処理までを行い、DWDM-PON によってセントラルオフィスへトラフィックを運び、残りの処理をマイクロデータセンタで行う。

表1 ベースバンド処理の機能分割パターン

	Split 1 (CRAN 相当)	Split 2	Split 3 (DRAN 相当)
RRH での処理量	200	200	200
Micro DC での処理量	360	80	160
Central office DC での処理量	480	400	320
DWDM-PON を流れるトラフィック量	2.4Gbps	2.5 / 1.7 / 0.8 Gbps	300 / 124 / 64 Mbps

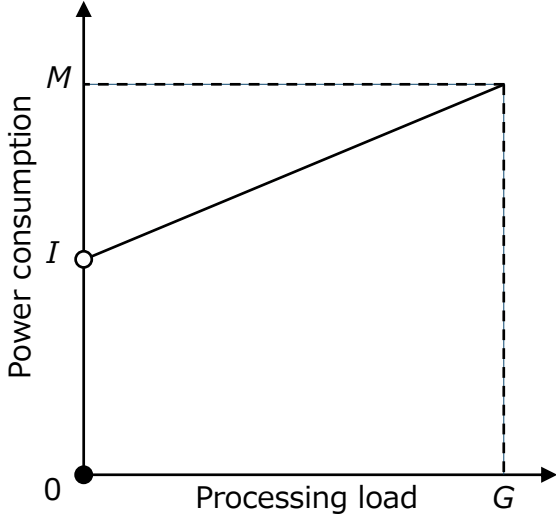


図2 消費電力モデル [13]

2.3 消費電力モデル

RRH から発生したセルラトラフィックは、セルサイト及びセントラルオフィスに設置されたデータセンタの物理サーバ上で稼働する仮想サーバにおいてベースバンド処理が行われる。仮想サーバの稼働及びベースバンド処理に必要な消費電力は、文献 [13] に示されている消費電力モデルに基づいて決定する。図 2 にそのモデルを示す。横軸と縦軸は処理量と消費電力をそれぞれ表す。G は仮想サーバが処理できる最大の処理量を、M はその時の消費電力を表す。I は、仮想サーバは稼働しているが処理を行っていない時の消費電力を表す。消費電力は処理量に応じて線形的に増加する。仮想サーバが処理を行わない際にその仮想サーバを停止できる場合には、消費電力は 0 となる。

DWDM-PON は、トラフィックを収容する波長数に応じて消費電力が発生するものとする。すなわち、全ての RRH から発生するトラフィックを少ない波長数で収容することによって、消費電力を抑えることができる。

3. 最適化問題の定式化

本章では、2. 章で示したネットワークにおいて、セルラトラフィックをベースバンド処理して IP ネットワークへ運ぶために必要となる総消費電力を最小化するための最適化問題を整数線形計画問題として定式化する。

3.1 変数定義

2. 章で示したモデルに基づいて以下のように変数を定義する。ネットワークに存在する RRH の総数を R とする。セルサイト及びセントラルオフィスをノードと総称し、その総数を N とする。ただし、セントラルオフィスをノード 1、セルサイトをノード $2-N$ とする。RRH が収容されるノードを決定する変数 a_n^i を導入し、RRH i ($1 \leq i \leq R$) がノード n ($1 \leq n \leq N$) に収容されている時に $a_n^i = 1$ 、そうでなければ $a_n^i = 0$ とする。

DWDM-PON の波長数を W とし、波長 w ($1 \leq w \leq W$) の

帯域を B_w とする。機能分割のパターン数を K とし、Split k ($1 \leq k \leq K$) と記述する。RRH i のトラフィックがノード n で処理され、Split k が適用され、DWDM-PON の波長 w で運ばれる時の、DWDM-PON を流れるトラフィック量を $B_{n,k,w}^i$ とする。

$X_{n,k}$ ($2 \leq n \leq N, 1 \leq k \leq K$) を、RRH トラフィックに対して Split k を適用した際の、ノード n で発生する消費電力とする。 $X_{1,k}$ ($1 \leq k \leq K$) を、RRH トラフィックに対して Split k を適用した際の、セントラルオフィスのデータセンタで発生する消費電力とする。 C_n を、ノード n の物理サーバを稼働することで発生する消費電力とする。 L_w を、DWDM-PON の波長 w を用いることで発生する消費電力とする。

3.2 最適化問題

総消費電力を最小化するための最適化問題を以下のように定義する。

Minimize :

$$\sum_{n=2}^N \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i (X_{1,k} + X_{n,k})$$

$$+ \sum_{n=1}^N x_n C_n + \sum_{w=1}^W l_w L_w \quad (1)$$

Subject to :

$$y_{k,n,w}^i, x_n, l_w \in \{0, 1\} \quad (2)$$

$$y_{k,n,w}^i \leq a_n^i \quad \forall i, n, k, w \quad (3)$$

$$\sum_{n=2}^N \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i = 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{n=2}^N \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K y_{n,k,w}^i B_{n,k,w}^i \leq B_w \quad \forall w \quad (5)$$

ここで、決定変数は $y_{k,n,w}^i, x_n, l_w$ であり、 $y_{k,n,w}^i$ は RRH i のトラフィックに Split k を適用し、ノード n で処理され、DWDM-PON の波長 w で運ばれる時に 1、そうでないなら 0 である。 x_n はノード n のデータセンタの物理サーバが稼働するなら 1、そうでないなら 0 である。 l_w は DWDM-PON の波長 w が用いられるなら 1、そうでないなら 0 である。ただし、 x_n, l_w は $y_{k,n,w}^i$ によって以下のように決定される。

$$x_n = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i \geq 1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$l_w = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{n=2}^N \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K y_{n,k,w}^i \geq 1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

最小化する式 (1) の第 1 項は RRH トラフィックのベースバンド処理を行う、マイクロデータセンタ及びセントラルオフィスの仮想サーバの消費電力であり、第 2 項はマイクロデータセンタ及びセントラルオフィスの物理サーバの消費電力であり、第 3 項は DWDM-PON の波長を用いることで発生する消費電力である。制約式 (2) は、決定変数が 0 あるいは 1 のみを取ることを

表す。制約式 (3) は、RRH トラヒックの処理が、その RRH が収容されているセルサイト以外のマイクロデータセンタでベースバンド処理が行われなことを示す。制約式 (4) は、全ての RRH トラヒックは、いずれか 1 つのマイクロデータセンタ、あるいはセントラルオフィスのデータセンタでベースバンド処理が行われることを示す。制約式 (5) は、DWDM-PON の各波長が収容するトラヒックの総量が、各波長のキャパシティを超えないことを示す。

4. 数値例

本章では、3. 章において定式化した最適化問題を解くことで、システムの総消費電力が最小化される機能分割パターンが得られることを示し、物理/仮想サーバの消費電力特性が適切な機能分割パターンに与える影響を考察する。

最適化問題の解は CPLEX [14] を用いて得た。最適解が複数存在する、すなわち、総消費電力が最小となる機能分割パターンが複数存在する場合には、そのうちの 1 つの解が用いられる。

4.1 パラメータ設定

図 1 において、セルサイト数を 1 とし、 $N = 2$ とする。DWDM-PON の波長数は $W = 3$ とし、各波長のキャパシティは $B_1 = B_2 = B_3 = 10$ [Gbps] とする。1 つの RRH から発生する実トラヒック量を 0.124 [Gbps] とする。RRH 数を 1 から 20 まで増加させることによって、DWDM-PON が収容するトラヒック量が増加することによって、機能分割のパターンがどう変化するかを評価する。

DWDM-PON の 1 つの波長を稼働するのにかかる消費電力は波長によらず $L_w = 20$ [W] とする。機能分割パターンの総数は $K = 3$ とし、各分割パターンにおける処理量および DWDM-PON に与えるトラヒック負荷は表 1 に従うものとする。ただし、RRH での処理はハードウェアで行われるものとし、システムの総消費電力からは除外する。セルサイト及びセントラルオフィスのデータセンタのサーバにおけるベースバンド処理は、物理サーバ上で動作する仮想サーバによって行われるものとする。セントラルオフィスの物理サーバは常に動作しているものとし、その消費電力 (C_1) は 200 [W] とする。セルサイトにおいては、1 つ以上の仮想サーバを稼働する際には物理サーバが稼働する。また、セルサイト及びセントラルオフィスで稼働する仮想サーバの消費電力は 2.3 節で示した図 2 に従うものとする。

本報告では、物理サーバ及び仮想サーバの消費電力特性が適切な機能分割パターンに与える影響を評価する。評価するシナリオにおける各パラメータを表 2 に示す。表中の太字は、Scenario 1 との相違点を表す。また、表中には、1 つの RRH トラヒックに対して Split 1, 2, 3 を適用した場合における、セルサイトとセントラルオフィスの仮想サーバの稼働に必要な消費電力の総和を示している。

各シナリオが想定している状況は以下の通りである。

Scenario 1 本報告における標準的な消費電力パラメータ。

Scenario 2 Scenario 1 から、マイクロデータセンタの仮想サーバの消費電力特性を悪化させた場合。

Scenario 3 Scenario 1 から、セントラルオフィスの仮想サーバの消費電力特性を悪化させた場合。

4.2 評価結果

図 3 に、Scenario 1-5 における、収容する RRH 数に対する、選択された各機能分割パターンの総数と、システムの総消費電力の関係を示す。総消費電力の図 (図 3(b), (d), (f)) には、最適解ではなく、常に同じ機能分割を用いた場合の結果 (Split 1, Split 2, Split 3) と、3. 章で定義した最適化問題の解から得られる結果 (Optimal) を示している。

Scenario 1 においては、表 2 に示すように、Split 2 と Split 3 を用いた場合の、1 つの RRH トラヒックを処理するのに必要な消費電力は等しくなる。また、RRH 数が 4 以下の場合には、用いる波長数も同じであるため、Split 2 と Split 3 を用いる場

合の総消費電力は等しくなる。しかし、ソルバが Split 2 を使う 1 つの解を出力している。一方、RRH 数が 5 以上の場合には、Split 2 を使う場合には用いる波長数が増加するため、Split 3 よりも消費電力が大きくなる。そのため、1 つの波長に収容するために、DWDM-PON で運ばれるトラヒック量が小さい Split 3 が選択される。

Scenario 2 においては、RRH 数が 6, 11 の場合を除いて、Split 2 が選択されている。これは、表 2 に示すように、Split 2 を用いる場合が消費電力が最も小さいためである。一方、RRH 数が 6, 11 の場合のみ、1 つの RRH トラヒックの機能分割が Split 3 となっている。これは、Split 2 と Split 3 の消費電力差 (15 [W]) が、使用する波長を増加するために必要となる消費電力 (20 [W]) よりも小さいため、Split 3 を利用し、トラヒック量を小さくすることで、1 つの波長に全てのトラヒックを収容するためである。一方、RRH 数が 6, 11 より大きい場合には、Split 2 と Split 3 の消費電力差の総和が、使用する波長を増加するために必要となる消費電力を上回るため、波長数を増やし、消費電力が小さい Split 2 が選択される。

Scenario 3 においては、RRH 数にかかわらず、全てのトラヒックに対して Split 3 が選択されている。これは、表 2 に示すように、Split 2 を用いる場合が消費電力が最も小さいためである。また、Split 3 は DWDM-PON に与えるトラヒック負荷も最小であるため、他の機能分割パターンが選ばれることは無い。

4.3 考察

前節に示した評価結果より、各 RRH トラヒックに対する機能分割の選択は、主に実現するために必要となる消費電力 (表 2) に大きく依存することがわかった。これは、本報告における各パラメータ設定では、どの機能分割パターンを選択しても、セルサイトでの処理を 0 にすることができず、仮想サーバの停止による消費電力の削減が不可能であるためである。

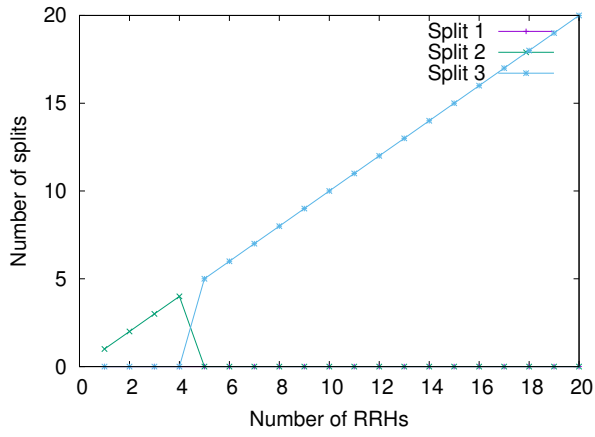
特に Scenario 2 の結果から、セルサイトのサーバの消費電力特性が悪い場合には、DWDM-PON の 1 つの波長を用いるために必要となる消費電力の大きさや、各機能分割パターンにおけるトラヒック量に依存して、機能分割の選択が変化することがわかった。これは、システムの総消費電力が、表 2 に示す消費電力パラメータのみで決定されず、最適化問題を解く必要があることを意味している。

Scenario 1 においては、Split 2 と Split 3 の消費電力が等しい。これは、本報告のモデルでは、DWDM-PON に与えるトラヒック負荷によって消費電力は変化しないためである。現実には、OLT や ONU の動作に必要な消費電力を考慮すると、トラヒック量に応じて消費電力は変化するため、そのような特性をモデルに組み込むことにより、さらに現実的な評価が可能となる。

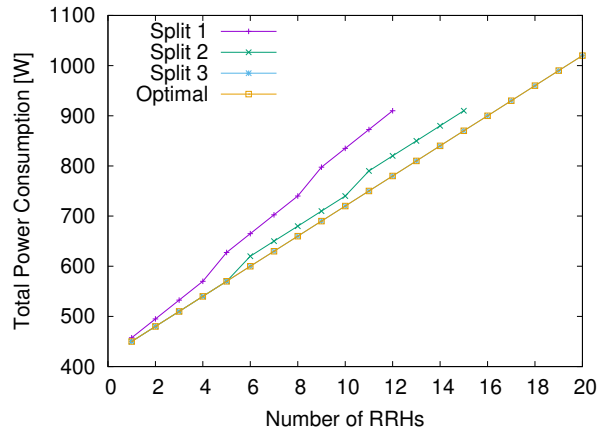
また、本報告における評価では、全てのシナリオにおいて、Split 1 が選択されなかった。これは、表 1 及び表 2 に示すように、Split 1 はセルサイトにおいて CPRI 処理が必要となるため、消費電力が他の機能分割に比べて大きくなるためである。このことから、C-RAN 構成に相当する Split 1 を導入するためには、CPRI 処理をハードウェアで行う等の方法により、消費電力を削減することが必要であると考えられる。

5. 関連研究

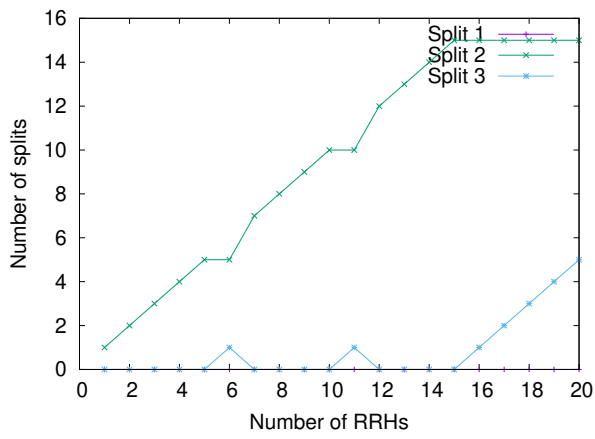
5G ネットワークにおける機能分割問題に関しては、既存研究が多数存在する。文献 [9] では、ベースバンド処理の機能分割が、フロントホールネットワーク負荷に与える影響を、セル構成や多重化の影響を考慮して評価している。フロントホールネットワークにはイーサネット等のパケットネットワークを想定し、トラヒックのパケット化が与える影響に着目している。しかし、パケットネットワークでは回避することができないキューイング遅延の影響が考慮されていない。本報告では、Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) によって各サイトが使用できる帯域が確保され、かつ遅延時間の保証も可能な DWDM-PON を前提としている。



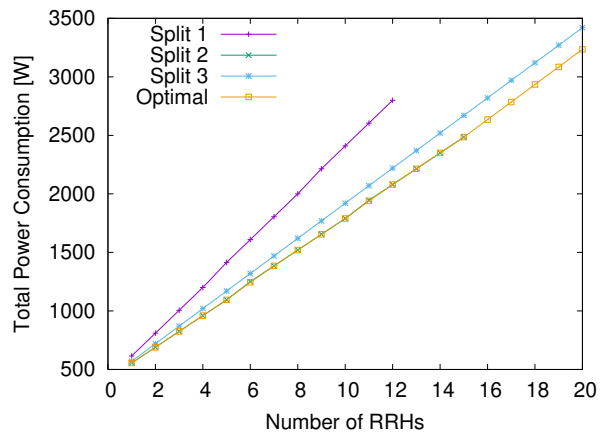
(a) Scenario 1: 選択された機能分割の分布



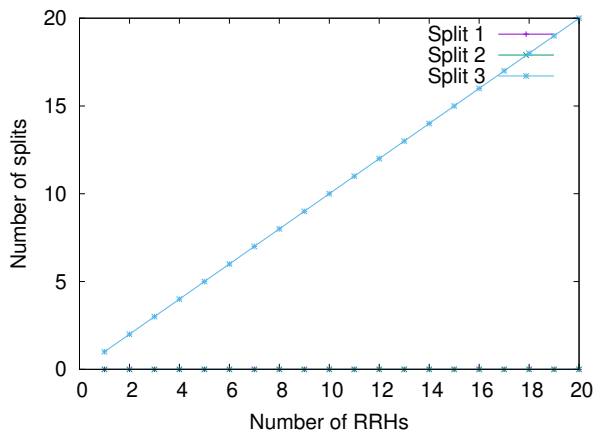
(b) Scenario 1: 総消費電力



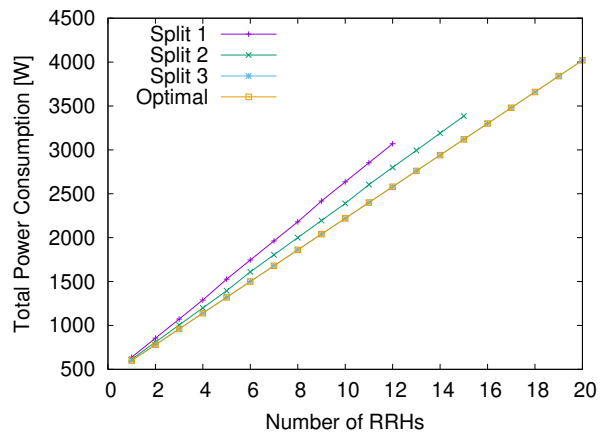
(c) Scenario 2: 選択された機能分割の分布



(d) Scenario 2: 総消費電力



(e) Scenario 3: 選択された機能分割の分布



(f) Scenario 3: 総消費電力

図3 評価結果

表2 消費電力パラメータ設定と機能分割パターン別の総消費電力

	Central office DC			Micro DC				Power consumption per RRH		
	G	M [W]	I [W]	G	M [W]	I [W]	C_2 [W]	Split 1 [W]	Split 2 [W]	Split 3 [W]
Scenario 1	480	20	10	480	20	10	200	37.5	30	30
Scenario 2	480	20	10	480	200	100	200	105	45	60
Scenario 3	480	200	100	480	20	10	200	127.5	105	90

文献[12]においては、機能分割問題を Virtual Network Embedding (VNE) 問題としてとらえ、整数計画問題として定式化し、Mobile Virtual Network Operator (MVNO) からのネットワーク構築要求に対して適切な機能分割を行った仮想ネットワークを構築する手法を提案している。しかし、機能分割を適用した際にセルサイト及びセントラルオフィスで必要となるサーバ資源量についても単純なモデルが用いられており、現実的ではないと考えられる。また、フロントホールネットワークに具体的なネットワーク技術を想定しておらず、消費電力も考慮されていない。本報告では物理/仮想サーバの消費電力をベースバンド処理量に応じて決定している。また、DWDM-PON を用いてフロントホールネットワークを構築することを想定し、その消費電力も考慮して機能分割を決定する最適化問題を定式化している。

文献[10]においては、ベースバンド処理の機能分割と、モバイル端末上で実行される負荷の大きいタスクの両方を、フォグノードあるいはクラウドノードへオフロードすることで、モバイルアプリケーションの遅延制約を考慮しながら消費エネルギーを最小化するための最適化問題を定式化している。その際、文献[11]で提示されているベースバンド処理の各プロセスに必要な処理量を用いている。しかし、フロントホールネットワーク及びバックホールネットワークに具体的なネットワーク技術を想定しておらず、その消費エネルギーモデルも現実に対応していないと考えられる。本報告における解析モデルはサーバ、ネットワークノード等の消費電力モデルとしてよく用いられる文献[13]に示された線形モデルを用いており、またフロントホールネットワークを構成する DWDM-PON の消費電力についても具体的な装置構成に基づいてモデル化している。

文献[8]では、DWDM-PON によって接続された複数のセルサイトで発生するセルラトラヒックのベースバンド処理を、セルサイトに設置されたフォグノード、あるいはセントラルオフィスに設置した BBU pool のいずれで行うかを決定するかを、消費電力を最小化するように選択する問題を定式化している。しかし、示されているモデルはネットワークポロジ制約を表現できていない、などの点で不完全であり、またベースバンド処理を行われた後の IP トラヒックを無視している。また、5G における機能分割を考慮していない。本報告の解析モデルは文献[8]のそれに基づいているが、ベースバンド処理の機能分割、ベースバンド処理後のユーザトラヒックの DWDM-PON への収容、ネットワークポロジ制約などを考慮することで、より現実的なモデルを構築している。

6. まとめと今後の課題

本稿では、DWDM-PON によって構築される 5G フロントホールネットワークにおける、ベースバンド処理の機能分割の特性を明らかにするために、システム全体の消費電力を最小化するための機能分割の選択問題を、整数線形計画問題として定式化し、数値例を示した。その結果、提案した定式化によってシステムの総消費電力が最小化される機能分割パターンを導出できることを示した。また、ベースバンド処理を行う物理/仮想サーバの電力特性が、適切な機能分割パターンに与える影響についても評価した。

今後の課題として、解析モデルが必要とする各種パラメータの適切な設定が挙げられる。特に、図2に示した物理/仮想サーバ

の消費電力特性やベースバンド処理における処理量と消費電力の関係などを、実際の機器のベンチマーク結果等を参考に設定したい。また、機能分割のパターンによって基地局側およびセントラルオフィス側において発生する処理時間を制約条件として記述し、DWDM-PON によって構築するフロントホールネットワークの距離特性を明らかにしたい。また、より大規模なネットワーク環境を想定した数値評価を行い、機能分割戦略の検討を行いたい。ILP ソルバによる計算時間の評価も重要である。

文献

- [1] J. Wu, Z. Zhang, Y. Hong, and Y. Wen, "Cloud radio access network (C-RAN): a primer," *IEEE Network*, vol. 29, pp. 35–41, Jan. 2015.
- [2] M. Peng, Y. Sun, X. Li, Z. Mao, and C. Wang, "Recent advances in cloud radio access networks: System architectures, key techniques, and open issues," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, pp. 2282–2308, Mar. 2016.
- [3] IEEE Standards Association, "P1914.1 - IEEE draft standard for packet-based fronthaul transport networks," available from <https://standards.ieee.org/project/1914.1.html>.
- [4] S. Zhou, X. Liu, F. Effenberger, and J. Chao, "Low-latency high-efficiency mobile fronthaul with TDM-PON (mobile-PON)," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, pp. A20–A26, Jan. 2018.
- [5] I. A. Alimi, A. L. Teixeira, and P. P. Monteiro, "Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, pp. 708–769, Nov. 2017.
- [6] L. M. P. Larsen, A. Checko, and H. L. Christiansen, "A survey of the functional splits proposed for 5G mobile crosshaul networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, pp. 146–172, Oct. 2018.
- [7] M. A. Habibi, M. Nasimi, B. Han, and H. D. Schotten, "A comprehensive survey of RAN architectures toward 5G mobile communication system," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70371–70421, May 2019.
- [8] R. I. Tinini, L. C. M. Reis, D. M. Batista, G. B. Figueiredo, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Optimal placement of virtualized BBU processing in hybrid cloud-fog RAN over TWDM-PON," in *Proceedings of GLOBECOM 2017*, Dec. 2017.
- [9] C.-Y. Chang, R. Schiavi, N. Nikaein, T. Spyropoulos, and C. Bonnet, "Impact of packetization and functional split on C-RAN fronthaul performance," in *Proceedings of ICC 2016*, May 2016.
- [10] Z. Cheng, Y. Tang, and H. Wu, "Joint task offloading and flexible functional split in 5G radio access network," in *Proceedings of ICOIN 2019*, Jan. 2019.
- [11] C. Desset, B. Debaillie, V. Giannini, A. Fehske, G. Auer, H. Holtkamp, W. Wajda, D. Sabella, F. Richter, M. J. Gonzalez, H. Klessig, I. Gódor, M. Olsson, M. A. Imran, A. Ambrosy, and O. Blume, "Flexible power modeling of LTE base stations," in *Proceedings of IEEE WCNC 2012*, Apr. 2012.
- [12] D. Harutyunyan and R. Riggio, "Flexible functional split in 5G networks," in *Proceedings of CNSM 2017*, Nov. 2017.
- [13] P. Mahadevan, P. Sharma, S. Banerjee, and P. Ranganathan, "A power benchmarking framework for network devices," in *Proceedings of Networking 2009*, May 2009.
- [14] IBM, "IBM ILOG CPLEX optimization studio," available from <https://www.ibm.com/jp-ja/products/ilog-cplex-optimization-studio>.